

報 告

巨大複雑系社会経済システムの創成力強化
—科学技術駆動型イノベーション
創出力強化に向けて—



平成23年（2011年）8月2日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会

巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会

この提言は、日本学術会議総合工学委員会「巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会」の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会
巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会

委員長	柘植 綾夫	(第三部会員)	芝浦工業大学学長
副委員長	大和 裕幸	(連携会員)	東京大学大学院新領域創成科学研究科 研究科長・教授
幹事	上田 完次	(連携会員)	(独) 産業技術総合研究所理事
幹事	吉村 忍	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	矢川 元基	(第三部会員)	東洋大学計算力学研究センター長・教授
	新井 民夫	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	有信 睦弘	(連携会員)	東京大学監事
	井口 雅一	(連携会員)	東京大学名誉教授
	井上孝太郎	(連携会員)	(独) 科学技術振興機構上席フェロー
	川田 裕	(連携会員)	大阪工業大学工学部長・教授
	久保田弘敏	(連携会員)	帝京大学大学院理工学研究科長・教授
	関村 直人	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科副研究科長・教授
	高安 秀樹	(連携会員)	(株) ソニーコンピュータサイエンス研究所 シニアリサーチャー
	中島 尚正	(連携会員)	(学) 海陽学園 海陽中等教育学校長
	藤井 孝藏	(連携会員)	(独) 宇宙航空研究開発機構情報・宇宙科学研究所副所 長・教授
	松本洋一郎	(連携会員)	東京大学理事・副学長

要 旨

1 作成の背景

科学技術の成果が社会に浸透し、相互の連関構造がますます複雑化、巨大化する 21 世紀において、工学は「ターゲットの拡散」、「スコープの拡散」および「ディシプリンの拡散」という 3 つの拡散現象の潮流に直面している。一方、社会経済的視点では、我が国は、これまで自動車、電気・機械などの工業製品に代表されるように、人工物の創成に関して高品質、高信頼性などの面で世界的な優位性を保ってきた。しかし、確実に予測される労働力人口の減少、エネルギー・環境、資源問題等に起因する国際産業競争力の低下問題という状況の下で、人工物創成力に関する我が国の優位性を維持、発展させるためには、21 世紀の社会と世界の求める高付加価値人工物の創成力を分析し、その一層の強化を図ることが求められている。

インターネットや金融システムに代表される人工物ネットワーク、原子力システムや宇宙システムなどの巨大人工システムは、空間的ないし物理的ないし社会的広がりが巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつ、その性能と信頼性は社会や経済に多大な影響を与える。このようなシステムを巨大複雑系社会経済システムと定義する。ここに、社会経済システムと呼ぶ理由は、このようなシステムは、経済的活動を通じた社会システムとして我々に作用するからである。このような観点に照らせば、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、ICT (Information and Communication Technology) などの人工システムも、社会経済システムに実用化された場合の社会的広がりと同様に内包される要素の複雑な相互関係に鑑み、巨大複雑系社会経済システムとして捉えるべきであろう。

第 20 期日本学術会議対外報告「提言：巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて」[1]において、巨大複雑系社会経済システムを定義しその特徴を明らかにするとともに、システム創成力としては、その構成要素を正確に分析し理解するための、いくつかの深い専門能力（アナリシス力）と同時に、システム全体を俯瞰する力（俯瞰力）、その上でシンセシス（領域知の統合による人工物の創出）や共創（複数の異なる行動主体による問題解決）を実現するための力（シンセシス力や共創力）が必要であることを述べた。そして、国を挙げた科学技術創造活動の成果を、真の社会経済価値の創造（イノベーションの創出）に結実させるためには、巨大複雑系社会経済システムの創成力の強化を図ることが求められ、その強化に向けて、行政、科学者コミュニティ、大学、産業界に対して人材育成と制度設計の観点から提言した。それは公表後、様々な形で日本の展望や第 4 期科学技術基本計画に活かされ、日本の展望においては、社会・経済的価値創造を目指し基礎研究・応用研究振興の両立を担保するための政策の強化の重要性の指摘や大学院における社会・経済的価値の創造に向けた幅広い教養を育てる教育の充実が重要であり、それに向けた国による計画的な教育投資の充実の必要性が明記された。また、第 4 期科学技術基本計画においても、「国家戦略としての科学・技術・イノベーション政策の一体的推進」が検討されており、「グリーンイノベーション」と「ライフイノベーション」という、社会・経済ニーズに応えようとするテーマが前面に掲げられ、課題解決型の研究を強化する方針が打

ち出された。

第 21 期の分科会では、第 20 期提言の内容をさらに具体的化し、実効あるものとするためにどのような取り組みが求められるかについて検討を行った。ここでは、第一に、巨大複雑系社会経済システムはどのような価値を持ち、なぜ、その創成力強化が必要であるのかについて明らかにする。次に、巨大複雑系社会経済システムの創成力強化のための重要構成要素として、特にどのようなシステム設計が必要であり、どのような人材育成法が必要であるかについて検討する。また、そうしたシステム創成力強化策に対する評価基準はどうあるべきかについて検討を行う。その上で、巨大複雑系社会経済システムの創成力を強化する研究開発プロジェクトのあり方と、それらに対する国の支援の仕組み、主に行政の役割について、社会経済システム研究・課題解決型研究の推進の仕組みという観点から検討する。最後に、行政、科学者コミュニティ、大学、産業界にむけた提案をまとめる。

2 現状及び問題点

人工物ネットワーク、原子力システム、宇宙システムなどは、これまで個別独立した人工システムとして理解され、それぞれの構想、設計、製作、運用・管理問題が扱われてきた。また、これらのシステムが生み出す技術的、社会経済的課題の解決にあたって、それぞれ個別独立に解決方法が模索されてきた。しかし、これらをともに巨大複雑系社会経済システムとして捉え、その共通特性を理解することが、これらのシステムが持つ社会経済的使命の重大性と、その確かな創成力を考える際の第一ステップである。

人工システムは、基本的な問題設定において、それを取り囲む環境とその目的という視点から、次の三つのクラスに分類し捉えることができる。

クラス I: 完全情報問題

目的および環境に関する情報が観測者にとって既知であり、問題を完全に記述できる。このクラスの問題では、最適解探索が中心課題となる。

クラス II: 不完全環境情報問題

目的に関する情報は既知であるが、環境に関する情報が観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、環境の変化に応じて適応的解探索が中心課題となる。

クラス III: 不完全目的情報問題

環境ばかりでなく、目的に関する情報も観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、目的も同時に定めていく必要がある共創的解探索が中心課題となる。

巨大複雑系社会経済システムは、クラス II あるいはクラス III としての特性を有する。このような特性を有するシステムを創成し、その社会経済的使命を果たすには、その特徴を十分に斟酌した創成力が必須である。

3 提案の内容

第 20 期提言の内容をさらに具体的化し実効あるものとするために、行政、科学者コミュニティ、大学、産業界にむけた提案をまとめる。

(1) 行政、科学者コミュニティ、大学、産業界への共通の提案

巨大複雑系社会経済システムの創成に関わる研究開発については、経済的価値、社会的価値、文化的価値の普及戦略と一体化した研究開発推進が必要であり、産学官連携さらには文理融合の価値共創型オープンイノベーションを目指すこと。

強い社会的ニーズや産業界からのニーズがあり、将来の発展に対する客観的な説明根拠がしっかりしていれば、学術的には緒についたばかりであっても、たとえば境界領域・新学術領域の政策誘導型研究プロジェクトとして採択して育てていけるような「俯瞰力、シンセシス力、共創力」の評価基準を構築すること。

(2) 行政への提案

提案(1)において得られる「俯瞰力、シンセシス力、共創力」の評価基準をもとに、関連する研究プロジェクトの採択を促すこと。実効ある俯瞰型人材育成プログラムとするためには、認識科学と設計科学の両面を学ぶ、真剣勝負の実践型教育となるように、多様な視点・専門分野が関わる課題解決型プロジェクトに、人材育成プログラムを組み込むこと。課題解決型プロジェクトとしては、国家基幹技術のような大型プロジェクトに加えて、中小規模の重要システムを対象とするプロジェクトも増やし、大学や公的研究機関が主体的に参画できるようにすること。

(3) 科学者コミュニティへの提案

研究プロジェクトに関しては、社会経済的価値増大にとっては、新機能開発や高品質達成だけではなく、ネットワーク環境下での市場普及や社会受容、さらに文化的波及を見据え、境界不定環境下のロバスト設計のような巨大複雑系社会システムの創成に特有の学術研究に積極的に取り組むこと。

(4) 大学への提案

提案(1)の実効ある俯瞰型人材育成プログラムに取り組む際に、課題解決型プロジェクトへの参加等を促すボトムアップ的な教育に加えて、シンセシスの科学や価値創成の理論を体系化しトップダウン的に教育するとともに、テーマ設定、種々の制約（成果・期間・費用など）、経済的インセンティブに関する工夫などを施し、真剣勝負となる仕組みを実装すること。また、巨大複雑系社会経済システムの創成に関する研究を、大学を中心として行える環境を整えること。単独の大学が取り組むケースのほかに、複数の大学が連携して取り組むケース、大学が他の公的機関や企業と連携するケースも想定し、主体となる機関と協力する機関の役割も明確にしながら進められるようにすること。

(5) 産業界への提案

社会と産業界は、上記の教育を受けた人材を積極的に雇用し、処遇すること。また、大学および研究型独立行政法人と積極的に連携して、そうした人材育成プログラムに参加・貢献すること。併せて、本報告に沿って行われる諸研究と開発の成果を、自らが作り出す巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に活用するとともに、そこに上記の大学と連携した人材育成プログラムも組み入れること。

目 次

1	はじめに	1
(1)	第 20 期提言の要点	1
(2)	第 20 期提言が関連施策等に与えた影響	2
(3)	第 21 期分科会の検討と本提案の視点および構造	3
2	巨大複雑系社会経済システムの特徴	3
(1)	巨大複雑系社会経済システムとは	4
(2)	人工システムのクラス分類	4
(3)	巨大複雑系社会経済システムの創成力の構成要素	5
3	巨大複雑系社会経済システムにおける価値創成	7
4	境界不定環境下でのロバストシステムの設計について	9
(1)	境界が決まらないものの設計について	9
(2)	ミスが生じてでも大丈夫なものの設計について	9
(3)	事例分析：インターネットと外国為替システム	10
(4)	境界不定環境下でのロバストシステムに求められる基本特性	12
5	産学官連携の俯瞰型人材育成システム	14
(1)	東京大学工学系における実践例	14
(2)	産業技術総合研究所の実践例	15
(3)	JAXA 宇宙科学における実践例	15
(4)	従来の教育システム、人材育成プログラムの課題	16
(5)	俯瞰力と俯瞰型人材育成に関するアンケート分析	17
(6)	産学官連携の俯瞰型人材育成における必須の要件	18
6	巨大複雑系社会経済システムの創成力に関する評価基準	20
7	社会経済システム研究・課題解決型研究の現状と強化に向けた方策	21
(1)	国の施策、ファンディングの現状と課題	21
(2)	社会経済システム研究・課題解決型研究の強化に向けた方策	22
8	巨大複雑系社会経済システムの創成力強化のための提案	24
	<参考文献>	26
	<参考資料 1> 総合工学委員会巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会 審議経過	27
	<参考資料 2> 人材育成の実践例	28
	<参考資料 3> 俯瞰力と俯瞰型人材育成に関するアンケートと回答例	31

1 はじめに

科学技術の成果が社会に浸透し、相互の連関構造がますます複雑化、巨大化する 21 世紀において、工学は「ターゲットの拡散」、「スコープの拡散」および「ディシプリンの拡散」というそれぞれの従来の認識範囲を越えて広がる 3 つの拡散現象の潮流に直面している。すなわち、ターゲットの拡散としては、従来は構築物や工業製品などの物象的人工物の設計と製造技術を専ら対象としてきた工学が、ソフトウェア、ヒューマンウェア、マネジメント、サービス、社会制度などの抽象的人工物の設計と実装にも関与するようになってきた。また、物象的人工物にも多様なソフトウェアやセンサーが組み込まれ、物象的人工物と抽象的人工物の融合も進んでいる。スコープの拡散としては、人工物の大規模化、複雑化が進むにつれて、ミクロな相互作用からマクロな相互作用までを連続的に考慮することや、設計と製造だけではなく企画、維持管理、廃棄、再利用といった人工物のライフサイクルを扱う必要が生じてきた。また、ディシプリンの拡散としては、科学技術の社会全体への影響が大きくなり、抽象的人工物の設計と実装に関与するにつれて、分野横断的な知識、視点、方法論が幅広く要求されるようになってきた。

我が国は、これまで工業製品に代表される人工物の創成¹に関して高品質、高信頼性などの視点から世界的な優位性を保ってきた。しかし、現在急速に進みつつある人口減少、環境問題の広がり、国際産業競争力の低下という状況の中で、人工物創成力に関する我が国の優位性を維持、発展させるために、21 世紀の社会と世界の求める高付加価値人工物の創成力を分析し、その一層の強化が求められている。

インターネットや金融システムのような人工物ネットワーク、原子力システム、地上における位置情報や通信を支える宇宙システムなどの人工システムは、空間的ないし物理的ないしは、社会的広がりが巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつ社会や経済に多大な影響を与える。このようなシステムを「巨大複雑系社会経済システム」と定義する。このような観点に照らせば、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、ICT (Information and Communication Technology) などの人工システムも、社会経済システムに実用化された場合の社会的広がりや内包される要素の複雑な相互関係に鑑み、巨大複雑系社会経済システムとして捉えるべきであろう。

第 20 期の本分科会においては、その成果として平成 20 年 6 月に提言「巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて」[1]をまとめ公開するとともに、同年 9 月にシンポジウムを開催し、同システムを創成する力の強化のための制度設計と人材育成を中心に議論を行い、大学、産業、行政等のそれぞれのミッションと行動の方向性について共有化を試みた。

(1) 第 20 期提言の要点

第 20 期提言 [1]においては、巨大複雑系社会経済システムを定義しその特徴を明らか

¹ はじめてでき上がること、作り上げること。

にするとともに、システム創成力には、その構成要素を正確に分析し理解するための、いくつかの深い専門能力（アナリシス力）と同時に、システム全体を俯瞰する力（俯瞰力）、その上でシンセシス²や共創³を実現するための力（シンセシス力や共創力）が必要であることを述べた。そして、国を挙げた科学技術創造活動の成果を、真の社会経済価値の創造（イノベーションの創出）に結実させるためには、巨大複雑系社会経済システムの創成力の強化を図ることが求められ、その強化に向けて、行政、科学者コミュニティ、大学、産業界は、「社会のための科学技術」の視点から、本問題の国民的認識を深化させる活動を行うと共に、創成力を構成する要素のうち「俯瞰力、シンセシス力、共創力」の評価基準の開発を行い、関連する研究及び人材育成プログラムの妥当な評価に向けて共有化するよう、提言を行った。また、個別的には、行政には、巨大複雑系社会経済システムを対象とした認識科学と設計科学の連携を可能とする産学官連携の俯瞰型人材育成プログラムを設定し、組織・分野を超えた行動を促すことを、科学者コミュニティには、巨大複雑系社会経済システムの共通特性や創成力、制度設計、人材育成プログラム、研究プロジェクトなどについて継続的に広く深く議論するための、認識科学と設計科学の連携を促すコミュニティを構築することを、大学には、従来の学部・専攻・学科の枠を超えて、巨大複雑系社会経済システムの創成力の育成を主眼とする教育プログラムを立ち上げ、行政や産業界とも積極的に連携して、人材育成に努めることを提言した。さらに産業界にも、上記の教育を受けた人材を積極的に雇用し、処遇すること。また、大学および研究型独立行政法人と積極的に連携して、そうした人材育成プログラムに参加・貢献することを提言している。

(2) 第20期提言が関連施策等に与えた影響

第20期提言[1]は公表後、様々な形で日本の展望や第4期科学技術基本計画に影響を与えた。

日本の展望[2, 3]においては、「学術とイノベーション」は表裏一体の関係にあり、「社会と世界の持続可能な発展の実現」には、「持続可能な科学・技術駆動型イノベーション⁴創出能力の一層の強化」と、それを実現する人材の育成・教育が重要になると記述された。その際、多様性・継続性を担保する基礎研究の振興を確実に推進しながら、社会・経済的価値創造を目指す基礎研究・応用研究振興の両立を担保する政策の強化が重要であり、その実現のために、それぞれの研究資金枠とその審査基準の明確化が必要である。また、人材の育成についても長期的視点を堅持しつつ国を挙げて継続することが重要であり、特に大学院教育においては、学術の進展に関する教育・研究にとどまらず、社会・

² 使用環境においてシステムの機能が目的を満たすようにシステムの構造を決定すること。人工物の創出のための広義の設計。

³ 狭義には、複数の主体の相互作用によって、有効な解を創出することであり、普通、主体の組み合わせには、人工物と人工物、人と人工物、人と人、組織と組織などがある。ここではさらに、環境や目的に関する情報が不完全な状況下において、成立可能な人工システムの機能と、環境や目的を同時に創出することを意味する。

⁴ 科学技術的知の創造の成果である技術革新の成果を主たる駆動力とし、他の様々な価値創造の成果群と複合的に結合し、新たな社会経済的価値を創造すること。

経済的価値の創造に向けた幅広い素養を育てる教育の充実も重要であり、これに向けた国による計画的な教育投資の充実が必要であると記述された。

総合科学技術会議にて策定中の第4期科学技術基本計画[4]においては、「国家戦略としての科学・技術・イノベーション政策の一体的推進」が検討されており、「グリーンイノベーション」と「ライフイノベーション」という、社会・経済ニーズに応えようとするテーマが前面に掲げられ、課題解決型の研究を強化する方針が打ち出された。巨大複雑系社会経済システムは、社会的課題を解決するために創成されるものが多いため、その創成力の強化につながる可能性がある。

(3) 第21期分科会の検討と本提案の視点および構造

第21期の分科会では、第20期提言の内容をさらに具体的化し、実効あるものとするためにどのような取り組みが求められるか、について、第2章において巨大複雑系社会経済システムの特徴について論じたのち、図1の構成に基づき検討を行う。

第一に、巨大複雑系社会経済システムはどのような価値を持ち、なぜその創成力強化が必要であるのかについて第3章において明らかにする。

次に、第4章では、巨大複雑系社会経済システムの創成力強化のための重要構成要素として、特にどのようなシステム設計が必要であり、どのような人材育成法が必要であるかについて検討する。前者に関しては、巨大複雑系社会経済システムの特徴であり、これまで学術的に論じられることのなかった、境界不定環境下でのロバストなシステムの設計について、インターネットと外国為替システムの事例分析を通して検討する。後者については、産学官連携の俯瞰型人材育成システムの具体化に向けて、既存の人材育成システムのケーススタディおよび、俯瞰力と俯瞰型人材育成システムに関する第20期、21期分科会委員へのアンケート調査を通じて検討する。また、そうしたシステム創成力強化策に対する評価基準はどうあるべきかについて検討を行う。その上で、巨大複雑系社会経済システムの創成力を強化する研究開発プロジェクトのあり方と、それらに対する国の支援の仕組み、主に行政の役割について、社会経済システム研究・課題解決型研究の推進の仕組みという観点から検討する。最後に、第21期分科会の成果として、第20期の提言を具体化し、実効あるものとするための、行政、科学者コミュニティ、大学、産業界にむけた提案をまとめる。

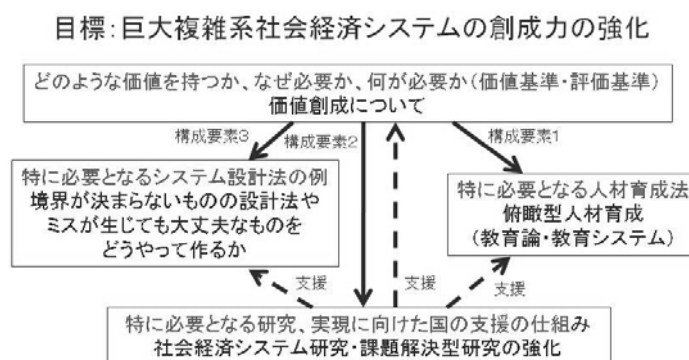


図1 第21期分科会の検討の構造

2 巨大複雑系社会経済システムの特徴

(1) 巨大複雑系社会経済システムとは

巨大複雑系社会経済システム[1]とは、空間的あるいは物理的あるいは社会的広がり
が巨大であり、その中に内包される多数の要素の相互関係が複雑であり、かつ社会や経済に多大な影響を与えるシステムと定義する。この定義では、もともと自然システムである地球システムも巨大複雑系社会経済システムの一つと言える。そこで、ここではさらに、人間が作り出す人工システムが主たる構成要素となるシステムに限定し、巨大複雑系社会経済システムと定義する。ここに、社会経済システムと呼ぶ理由は、このようなシステムは、経済的活動を通じた社会システムとして我々に作用するからである。巨大複雑系社会経済システムは、我々の生活や社会・経済の安全を有形無形の形で支えており、これなしでは我々は生活できないといっても過言ではない。その維持、強化、さらに新しいシステムの創成が国、社会、企業などの存立に大きな影響を与えている。

巨大複雑系社会経済システムは、システムの巨大さ、複雑さ、社会経済との関係によって、いくつかの種類がある。第一は人工システムが単体として大規模複雑系であるもので、地上における位置情報や通信を支える宇宙システムがこれにあたる。第二は単体として大規模であっても構造は複雑とは限らないが、社会経済と複雑に相互作用するので、巨大複雑系社会経済システムと考えるべきシステムである。原子力システム、電力・交通システムなどがこれにあたる。さらに、単体として規模は大きくないものの、人間の介在により結合されて巨大なネットワークを構成し、その間の関係性が複雑となり、社会経済システムに埋め込まれた人工システムがある。例としてはインターネットや金融システムおよび国家行政システムのような人工物ネットワークがあげられる。このような観点に照らせば、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、ICTなどの急成長しつつある人工システムも巨大複雑系社会経済システムとして捉えるべきであろう。

これらの巨大複雑系社会経済システムは、これまで個別独立したものとして理解され、それぞれの構想、設計、製作、運用・管理問題が扱われてきた。また、これらのシステムが生み出す技術的、社会経済的課題の解決にあたって、それぞれ個別独立に解決方法が模索されてきた。しかしながら、それらとともに巨大複雑系社会経済システムとして捉え直し、その共通特性を理解し、そのようなシステムを構造、設計、製作、管理・運用するための創成力を磨くことが肝要である。第4期科学技術基本計画[4]の中に盛り込まれた新成長戦略が目指す2大イノベーション「グリーンイノベーション」も「ライフイノベーション」も、ともに巨大複雑系社会経済システムを創成するという他にない。新成長戦略の実現において、巨大複雑系社会経済システムの創成力の強化がいかに大事かということが分かる。

(2) 人工システムのクラス分類

巨大複雑系社会経済システムの基礎となる人工システムは、基本的な問題設計において、それを取り囲む環境とそのシステムの目的という視点から、次の三つのクラスに分

類される。

クラス I: 完全情報問題

目的および環境に関する情報が観測者にとって既知であり、問題を完全に記述できる。このクラスの問題では、最適解探索が中心課題となる。工場のスケジューリング問題は、この範疇になると考える。

クラス II: 不完全環境情報問題

目的に関する情報は既知であるが、環境に関する情報が観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、環境の変化に応じて適応的解探索が中心課題となる。原子力発電システムの耐震性能問題は、この範疇になると考える。

クラス III: 不完全目的情報問題

環境ばかりでなく、目的に関する情報も観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。このクラスの問題では、目的も同時に定めていく必要がある共創的解探索が中心課題となる。インターネットはこの範疇になると考える。

巨大複雑系社会経済システムにおいては、人工システムを社会（環境）や人間（目的）から孤立した系として扱うことはできず、本質的にクラス II ないしクラス III のシステムとならざるを得ない。また、たとえ設計時にはクラス I の人工システムとしてクローズドな環境でトップダウン的に設計されたとしても、利用され、普及することによって、後天的にクラス II ないしクラス III としての特性を帯びるようになる。クラス II あるいはクラス III としての特性を有するシステムを、クラス I であるかのように認識し取り扱うときに様々な齟齬が発生する。

したがって、個々の巨大複雑系社会経済システムの表層の特性に惑わされることなく、クラス II ないしクラス III としてのシステムの本質的な特性を理解した上で、そのようなシステムを構想、設計、製作、管理・運用するための創成力を磨くことが肝要である。

(3) 巨大複雑系社会経済システムの創成力の構成要素

クラス II ないしクラス III としての特性を有するシステムを創成するには、その特徴を十分に斟酌することが必須であり、創成力には、構想力、設計力、製作力、管理・運用力がすべて含まなければならない。

文献[3]の社会のための科学と知の統合の議論において、認識科学と設計科学の連携の促進が「社会のための科学」にとって重要であると提言されたが、巨大複雑系社会経済システムに対しても、まず、これらシステムの「あるもの」や「存在」を探求する認識科学が必要であり、様々な事例の分析を通して、巨大複雑系社会経済システムの認識科学を深めていくことが必要である。そのようにして導出された知に基づいて、巨大複雑系社会経済システムの「あるべきもの」や「当為」を探求する設計科学が必要となる。このとき、もはやクラス I のシステムに対する設計科学ではなく、クラス II やクラス

III としての特性を勘案した上でのシンセシス力や共創力が、巨大複雑系社会経済システムの設計科学の本質となる。つまり、認識科学と設計科学の連携を、巨大複雑系社会経済システムに対してこそ強力に推進すべきであると言える。

創成力強化の観点から言えば、システムの構成要素を正確に分析し理解するためのいくつかの深い専門能力(アナリシス力)と同時に、システム全体を俯瞰する力(俯瞰力)、その上でシンセシスや共創を実現するための力(シンセシス力や共創力)を必要とする。これまでの教育や人材育成は狭い専門分野におけるアナリシス力の深化、強化に精力が注がれてきた。改めて、巨大複雑系社会経済システムの創成力における、俯瞰力、シンセシス力、共創力の重要性を強調したい。

なお、巨大複雑系社会経済システムの創成においては、それを構成する個々の要素技術よりも、人工システムとしての特徴を決める、これらのシステムのシステムコンセプト、システムアーキテクチャ、ビジネスモデル、デファクトスタンダード(事実上の標準)、サービスデザイン、リスク管理手法、成長するシステム⁵などの創成力がより中心課題として浮上してくる。

⁵ システムの性能や属性が固定化されておらず、意図的であるか自律的であるかを問わず、状況変化に応じて性能が時間とともに向上していくシステム。

3 巨大複雑系社会経済システムにおける価値創成

巨大複雑系社会経済システムは、経済的活動を通じた社会システムとして我々に作用し、我々の生活や社会・経済の安全を有形無形の形で支えており、これなしでは生活できないといっても過言ではない。その維持、強化、さらに新しいシステムの創成が国、社会、企業などの存立にも大きな影響を与える。これらの点を、巨大複雑系社会経済システムの価値創成力という観点から考察する。

人工システムの与える影響は「価値」として評価される。価値についての言説や議論は、古代ギリシャ以来「絶対的価値と相対的価値」、「あるべき価値とあるがままの価値」、「客観的価値と主観的価値」、「価値は他の価値に還元できるのか」、「価値は他の価値の制約となるのか」などの観点から、現代に至るまで多様に論じられてきている。ここで述べる巨大複雑系社会経済システムに関わる価値とは、認識という行為の対象としてではなく、人工システムの創成という当為を通して生みだされる価値、すなわち経済的価値、社会的価値、文化的価値である。すなわち、巨大複雑系社会経済システムの価値は、市場的普及、社会的受容、文化的波及の前に事前に決定できるものではなく、環境や行動との相互作用による関係の創発⁶として捉える必要がある。

そもそも人工システムの創成は、既存世界を認識することから始められる。認識対象としての実世界は、人間、人工物、環境（自然、社会）から構成され、全体として複雑かつ大規模で動的な開放系である。人間は実世界全体をそのまま認識することはできず、限定された時空間的視点を定めるため、構成要素間の相互作用の無視が容認されることになる。その結果、互いに遮断された領域が生成され、領域内の獲得知識の精緻化と完全性が追究されてきた。すなわち、既に存在する人間、人工物、環境（自然、社会）を孤立系として分析することになり、それぞれを対象とする、たとえば、人文学、工学、自然科学、社会科学という学問が生まれ、さらに細分化された学問領域が生み出されてきた。

一方、新しい人工システムを創成するためには、必要知識が集められなければならない。必要知識は社会的要請の反映であり、集められた要素知識の結合が設計される。その際、機能を満たす結合の可能性は一般に多数あるので、たとえば目的関数を導入して、制約条件の下で可能な設計解の中から最適な設計解が探索される。既存物の全体から部分的知識を抽出するアナリシスと部分知識から新奇な全体を人工物として構成するシンセシスには本質的差異がある。統合には設計のための統合（構成化）だけでなく、認識のための統合（体系化）がある。前者が社会的要請によるのに対し、後者は実世界の複雑さの背後に潜む普遍原理の発見や統一的理解への欲求という動機によるものである。体系化された知識は継承され、文化的価値として波及し、実世界に埋め込まれる。

このようにして人工システムが創成されるが、実は、構造化された人工システムそれ自体では価値を生み出さない。人工システムは、環境（自然、社会）と人間の構成する舞台

⁶ 多数の要素から成るシステムにおいて、要素間の局所的な相互作用によりシステムの大域的な振る舞いが現れ、その大域的振る舞いを拘束するという双方向の動的過程を通して、要素の単純な総和にとどまらない新しい機能や形質、行動を示す秩序が形成されること。

にいわばプレイヤーとして登場し、それらと相互作用することにより価値を生み出す。人工システムは、環境において作動し機能を発現し、人間の効用を満たし、社会的、経済的価値を創成しなければ、単に人工的なモノでしかない。ここで重要なのは、認識対象の実世界だけでなく実現対象の実世界もまた、大規模かつ複雑で動的な開放系であることである。すなわち、開放系から抽出された完全知識系を用いて閉鎖系としての人工システムを構成するが、その創成された人工システムは再び情報が不完全な開放系に放たれることになる。

人工システムは、創成時に想定された環境下で作動し、想定した機能を発現し目的を達成すると期待される。しかし、これを環境や目的に関する情報をあらかじめ完全に知ってから設計するののかといえ、そうではない。環境は予期せぬ変動をするし、設計者の意図や目的さえも未確定の場合がある。第2章で述べたように、人工システムは基本的な問題設計においてそれを取り囲む環境とそのシステムの目的という視点から、3つのクラスに分けられる。すなわち、クラス I : 完全情報問題、クラス II : 不完全環境情報問題、クラス III : 不完全目的情報問題である。不完全情報下の実世界に放たれた人工システムは、たとえば、インターネット環境下で見られるように、しばしば思いがけない付加機能を生み出す一方、思いがけないリスクの要因となる。前者は経済的価値を拡大するが、後者は付加機能の社会的受容の困難さをもたらす。すなわち、人工システムの価値は、市場普及、社会受容、文化波及の前に事前に決定できるものでなく、環境や行動主体との相互作用による関係の創発として捉える必要がある。

以上述べてきたように、巨大複雑系社会経済システムの影響は「価値」として評価され、この影響には、経済的価値の市場的普及、機能的価値の社会的受容、知的価値の文化的波及がある。環境に開いたクラス II、及び、行動主体に開いたクラス III の人工システムである巨大複雑系社会経済システムの創成力が重要であるのは、この人工システムに起因する不完全情報下でのリスクの回避という社会的受容性の向上のためだけでなく、経済的価値の増大、さらに、知的価値の文化的波及にとっても本質的だからである。

4 境界不定環境下でのロバストシステムの設計について

2章でも述べたように、巨大複雑系社会経済システムの創成においては、それを構成する個々の要素技術よりも、人工システムとしての特徴を決める、これらのシステムのシステムコンセプト、システムアーキテクチャ、ビジネスモデル、デファクトスタンダード、サービスデザイン、リスク管理手法、成長するビジネスなどの創成力が中心課題として浮上してくる。本章では、クラス II、クラス III の特徴を有する人工システムである巨大複雑系社会経済システムを創成する際に、どのような体制で臨み、設計し、実際に製造し、維持・管理をしていけばよいかを含めて、このシステムの設計という観点から検討する。

現実の社会・経済の中に根付くような巨大複雑系社会経済システムの構築には、複数の学問分野にまたがるような視点が必要不可欠である。一般的な広い視野を持ってこのような問題を考察し、一定の指針を想定しておくことは、システムを構築する際の基盤となるはずである。なかでも特に注目したいのは、このような人工システムの設計である。設計が十分に洗練されたものでなければ、現実の社会の中に置かれた時に不測の事態が早晚発生し、システムが問題を起こすことは必至である。逆に、設計に当たる部分に関する知見が充実していれば、それを実現するための体制を整えることも、システムを維持・管理する際の道筋も見えやすくなるだろう。

(1) 境界が決まらないものの設計について

クラス II とクラス III の人工システムにおいては、環境に関する情報が観測者には予測できず、問題を完全に記述できない。そこではじめに、境界が決まらないようなものの設計とはどういうことかについて考える。たとえば、アリの巣は個体数の増加に伴って成長するし、植物も環境に合わせて根や枝を自由に伸ばしている。このような自然物にはしばしば見られる例のように、環境の変化に応じて適応的に形を変えていくような仕組みを、どうすれば人工システムにおいて実現できるのかを考える。

環境に応じて形を変えながら、全体としての秩序と機能を持つようなシステムを横断的に見渡すと、①自律分散、②新陳代謝、③共通目的、という3つの特性を持つ場合が多いことがわかる。ここで、①は、システム全体が自律的に行動し成長する要素の集合によって構成されており、近傍との相互作用によって全体の秩序が作られることを意味している。②は、各要素は古くなると新しいものに入れ換わるとともに、環境に合わせて新たに要素が生まれてくる性質である。また、③は、各要素が全体の共通目的を知り協力し合う特性を持つことである。すなわち、全体に共通する目的を持った上で、環境の変化に応じて増減する要素が自律的にシステムを構成することによって、境界が決まらないような形でシステムが自発的に成長していくことになる。

(2) ミスが生じて大丈夫なものの設計について

次に、ミスが生じて大丈夫なものを作るにはどうしたらよいか、という課題を考える。巨大なシステムにおいては、細部に至るまですべてが完璧に機能し続けるという可

能性は低い。このため、何らかの原因で発生したミス拡大させないような仕組みによってシステム全体の機能を失わないようにすることが重要である。まず、ミスの発生を可能な限り未然に防ぎ、仮にミスが生じてシステム全体の機能を失わず、さらに、システムを元のミスのない状態に自動的に復帰させるような仕組みを解明し、そのような仕組みを内蔵させた人工システムの設計を目指すのである。

ミスの発生に関する対処としては、事前の処理としては、①可能な限りのシナリオ想定、②シミュレーションによる予想、などに基づいて、③多重安全性・多様性を考慮した設計をし、事後の処理としては、④徹底的な分割統治による管理と、⑤必要に応じての速やかな更新、という5つの方法が代表的である。ここで、①は、過去に起こったことや理論的に起こり得ることをリストアップし、対策を準備しておく方法であり、原子炉の安全評価などによく用いられている。②は、人間の論理だけでは追跡できないような複雑なシステムの動作をコンピュータ・シミュレーションによって確認し、トラブルの発生を予想する方法であり、LSI の設計などで活用されている。③は、同じような機能を持つ仕組みを複数用意しておき、どれかが機能停止しても全体の機能を失わないような仕組みであり、単独でも機能を果たせるジェットエンジンを左右に搭載する飛行機が代表的である。また、生態系は多種多様な生命が共存することによって、システム全体の安定性が高くなっていると信じられている。④は、構成要素や要素の集合が形成するユニットを厳しくチェックすることによってミスの発生自体を押さえこむ方法であり、既存の製造工場などでも多く使われている。⑤は、ソフトウェアのバージョンアップなどにおいてポピュラーな方法であり、ミスが発見されると速やかに改良版を用意し、古いバージョンと入れ替えることでシステムを常に最新の状態に保つ。

これらの既存の方法は、どのクラス的人工システムにも有効ではあるが、環境や目的が絶えず変化し続けることが期待されるようなクラス II、III に属する巨大複雑系社会経済システムに対しては十分とは言えない。一方、例えば、免疫系や生態系などの生命システムには、上記の分類には属さないような未知の仕組みによってロバスト性が高くなっている可能性が高い。新たな知見を人工物に応用する視点は、常に持ち続けなければならない。

(3) 事例分析：インターネットと外国為替システム

次に、現代社会において、境界なしに成長し、ミスが生じて大丈夫な人工システムの成功例をふたつ挙げ、それらの特性について考察する。第一の事例は、インターネットである。

1960年代に大学間のコンピュータを接続することから始まったコンピュータネットワークは、1980年代に基本的な通信の約束事であるプロトコルが確立し、その後、バージョンアップを繰り返しながら、現在のインターネットにまで発展している。今では、インターネットは社会基盤として欠くことのできないものとなっており、仮にインターネットが機能を停止するようなことがあれば、どれほどの被害が発生するか計り知れない。

インターネットの成功の秘訣は、その単純さにある。インターネットはユーザーが使う端末のコンピュータと情報の受け渡しだけを担当するルータとよばれる2種類のコンピュータの集合体である。すべてのコンピュータにはIPアドレスと呼ばれる番号が割り振られ、ケーブルや無線通信でつながったコンピュータ同士は、共通のプロトコルにしたがってパケットという単位で情報のやりとりをする。ルータの仕事は、入って来たパケットをアドレスに基づいて仕分け、それぞれを連結した中の適切なコンピュータに受け渡すことである。すべての情報がきちんと送れたかどうかは端末同士で確認する。

それぞれのコンピュータは自分とつながったコンピュータだけしか見ていないが、ルータ同士は一定時間間隔でお互いに動作確認をしているので、あるルータが突然に機能を停止した場合でも、そのルータにはパケットが送られなくなり、別の経路が自動的に選択されるようになる。端末同士は全パケットが送受信されたことを確認するまで何度もパケットの再送を繰り返すので、どこかにトラブルがあっても情報を確実に送り届けるという目的は確実に達成される。ルータや端末を増設することでネットワークは簡単にいくらでも大きくすることができるので、現在では、世界中で数十億台ものコンピュータが連結されており、さらに増加しつつある。

第二の成功している人工システムの事例は外国為替システムである。国際的な金融機関の間で取引されている通貨の交換の市場である外国為替市場は、現在、いくつかの民間企業がそれぞれ独立に維持管理しているコンピュータシステムによって運営されている。外国為替市場は、一般の人から見れば、ニュースで為替レートを見たときに存在を知る程度であり、インターネットと比較するとあまりなじみがない。しかし、日本の年間の国家予算をはるかに超えるおよそ350兆円もの取引が連日行われており、世界最大の自由市場であり、世界経済の背骨とも言える極めて重要なシステムである。

インターネットは誰でも接続できる仕組みになっているのに対し、外国為替システムは巨額のお金を扱うので、利用者は限定されている。しかし、それは排他的な制限ではない。素姓の明らかな金融機関であれば、市場を運営している企業と契約することによって自由に参加することができる。この点で、境界なしに成長できるシステムになっている。契約をした金融機関は、専用回線で市場業務をするサーバーコンピュータとつながり、売り買いの注文を發し取引を行うことができる。この取引のルールはシンプルで、最高買値と最安売値がマッチしたところで早い者勝ちで取引が成立する。ひとつのミスが発生も許されないシステムであるので、特に安全性を重視した設計になっている。誰が使うかわからないインターネットとは物理的に独立したネットワークを構成することにより悪意のあるものの侵入を未然に防ぎ、サーバーコンピュータも世界の複数の拠点に分散されており、さらに、取引情報は何重にもバックアップが取られるようになっている。

現在うまく機能しているインターネットや外国為替システムであるが、問題がないわけではない。インターネットでは、①情報量の増加によって輻輳が発生しスピードが落ちること、②悪意を持ったウィルスなどによって機能に障害が発生すること、③ルータの維持管理などの責任者が多数の組織にまたがっており明確でないこと、などが不安材

料である。また、外国為替システムの問題点としては、①維持管理が個々の民間企業に一任されており透明性がないこと、②アルゴリズム取引などによる市場の超高速化への対応が不十分であること、③暴騰や暴落の発生メカニズムなど市場そのものに関する基礎研究が不十分であること、などがあげられる。

インターネットは情報科学分野の長期にわたるアカデミックな研究の成果の結果として誕生し、その詳細な仕組みを熟知している人材は世界的に豊富である。それに対し、外国為替システムは、十数年前までは人間が直接集まって取引をしていた自由市場の仕組みを民間企業が独自にコンピュータシステム化して運営しているものであり、ライバル関係にある市場を運営している企業同士の情報交換の場はほとんどなく、世界的にみてもアカデミックかつ中立的な視点からこのシステムの研究を行う組織もない。通貨の番人である中央銀行といえども外国為替システムの中では単なる 1 ユーザーであり、システムそのものはブラックボックスである。システムの詳細な全体像を知る人材はそれぞれの民間企業の中にしかいないのが現状である。

この 1、2 年の間にコンピュータが自動的に発注するアルゴリズム取引が市場の取引の過半数を占めるようになり、従来にはなかったような速さで価格が乱高下するなどの不穏な兆候が散見されるようになっており、予測のできないような大きな問題が突然発生する可能性がある。現状のように個別の企業が閉鎖的に全責任を負うような体制では、広い視野からの問題の分析ができず、適切な対処ができなくなるのではないかと危惧される。外国為替システムに関するアカデミックな基礎研究の体制を整えて、システムを熟知した人材を広く育成し、その上でミスが発生させないで自由に成長できるような複雑システムとして市場システムの安定運営と発展を図るべきである。

(4) 境界不定環境下でのロバストシステムに求められる基本特性

成功している巨大複雑系社会経済システムの特徴を整理すると、①基本となる構造やルールはシンプルであること、②曖昧さなく局所的に処理できること、③無制限に成長できること、④エラーの発生はその都度厳格にチェックされること、という 4 つ特性が重要であることがわかる。

しかしながら、境界不定環境下ではどれほど事前にあらゆる可能性を想定しておいても過去には起こったことがないような事態が発生し、システム的设计の限界を越えるような状況も覚悟しておかなければならない。そのようなときにシステムを救うるのは、広い視野を持ちシステム的设计から運用までを熟知した人材による臨機応変なシステム的设计変更や再構築である。すなわち、システムの構成要素を分析、理解する専門能力とシステム全体を俯瞰し、大きな破綻の要因につながり得るクリティカル要素を把握して、その対策を内在するシステムを創成できる人材の育成こそが最大の対策と言える。人材の育成を伴わないような巨大複雑系社会経済システムは、クラス I のシステムとしては機能できたとしても、クラス II、あるいは、クラス III のシステムとしては常に脆弱さのリスクにさらされているといってもよい。システム自体の再構築をできるような人材の育成プログラムも包含した形での、巨大複雑系社会経済システム的设计が求めら

れるのである。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う設計想定を超えた大津波によって起こされたと推定される東京電力福島第一原子力発電所の事故は、まさに「境界不定環境下でのロバストシステム創成」に対して自然が投げかけた重大な命題であると言える。すなわち、安全設計の範囲を越えて想定される重大事故に対するアクシデント・マネジメントや退避およびライフラインの確保等の防災計画を含むシステム設計に対する基本的な考え方を、巨大複雑系社会経済システムの設計に如何に取り入れるかの命題は、産業と学术界と行政が一体となって緊急に取り組むべき重要課題である。

5 産学官連携の俯瞰型人材育成システム

巨大複雑系社会経済システムの創成において、システム全体を俯瞰するための俯瞰力は、普通シンセシス力との組み合わせで論じられる場合が多いが、アナリシス力を的確に活用する際の指針を与えるたいへん重要なものである。これまでの教育や人材育成は、狭い専門分野におけるアナリシス力の深化・強化に精力が注がれる傾向が強かったが、今後は、俯瞰力、シンセシス力、共創力の教育も、巨大複雑系社会経済システムを創成して行く上で重要である。そのためには、巨大複雑系社会経済システムを対象とした認識科学と設計科学の連携を可能とする産学官連携の俯瞰型人材育成プログラムを設定し、組織・分野を超えた行動を促すことが重要である[1]。

そこで本章では、この産学官連携の俯瞰型人材育成システムが、実効性のある具体的なシステムとなるための要件に関する検討を行った。まず、国内で実施されてきたさまざまな教育システム、人材育成プログラムの調査・分析を行い、その結果、様々な機関において、俯瞰型あるいは俯瞰力養成を謳う教育システムや人材育成プログラムが実施されていることが明らかとなった。この中から、システム創成力の強化が比較的意識されている具体的な事例を3つ、本章の(1)から(3)においてケーススタディとして取り上げ（＜参考資料1＞を参照）、さらに、調査・分析によって明らかにされた、俯瞰型あるいは俯瞰力養成を謳う教育システムや人材育成プログラムにおける課題を(4)において論じた。

また、本報告では、本分科会の20期、21期の構成員に対して俯瞰型人材育成に関するアンケート調査を行った（＜参考資料2＞を参照）。そこで(5)および(6)では、このアンケート調査結果から、俯瞰型人材育成に必須の要件の抽出を試みた。

(1) 東京大学工学系における実践例

東京大学の工学部システム創成学科・工学系研究科システム創成学専攻における学部・大学院教育[5]での教育目的は、俯瞰的視点とシステム思考に基づき戦略的に意思決定を行う能力、特定専門分野におけるアナリシス能力を備え、俯瞰的視点から先端的要素技術の開発ができる人材、革新的なシステムの創出ができる人材の養成である。その実現に向けて、基礎分野のディシプリンの確立と俯瞰的、分野独立的なシステム創成学をバランスよく学べるように、システム創成学を構成する重点分野に関連する先端的知識や領域によらない基盤的知識に関する講義群に加えて、専門としたい工学基礎分野を学生が自主的に選択して主体的に学ぶ基礎学理演習や、俯瞰的、分野独立的な思考法や実践的適用能力を習得することを目的とした応用演習等を用意している。

博士課程を中心とした人材育成については、東京大学大学院工学系研究科のすべての専攻、学科が関わる7つのグローバルCOEプログラムが進行中である。そのうちの1つであるグローバルCOEプログラム「機械システムイノベーション国際拠点」[6]では、ナノ空間の現象がマイクロ空間に展開する融合領域を拡張ナノ空間と呼び、それを活用した革新的な機械システムの創成と学問・技術体系の構築を目標として、応用化学、化学システム工学、精密工学、機械工学、産業機械工学、航空工学、システム創成学、マテ

リアル工学の8専攻が参加し進められている。ここでは、人材の能力の構成要素を、①基礎力（自然科学と人文社会科学の基礎）、②専門力（機械工学に関する専門知識と技術・社会・環境に関する俯瞰的知識）、③リテラシー（言語力、情報リテラシー、技術リテラシー、法制リテラシー）、④コンピテンシー（創造力、課題設定解決力、遂行力、自己管理能力、チームワーキング、リーダーシップ、責任感、使命感）の4種類と考え、工学と社会を俯瞰できる能力の涵養、国際性と深い専門知識に基づいた競争力の涵養、産業界・学術界で活躍するためのリーダーシップの涵養、を目標として活動している。たとえば、専攻横断型PBL(Project Based Learning)⁷では、産業界や学内から提示された新技術開発テーマに関して、異なる専攻・専門の学生5、6名のチームを編成し取り組んでいる。

また、原子力系のグローバルCOEプログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」では、エネルギーや放射線応用のベースとして、全体を包含しうる原子力社会学を定義している。人文社会科学を含め、社会のための技術、科学をどのように進めていくべきかという観点で工夫し、法律と技術の関連付けである法工学、核不拡散、地域住民とのパブリックコミュニケーションなどを中核に置いて人材育成を進めている。また、IAEA(International Atomic Energy Agency)などでの国際インターンシップ、国際ワークショップ、サマースクール、海外武者修行、海外セミナーなど、を通して国際的な視野を広げる活動も積極的に行っている。

(2) 産業技術総合研究所の実践例

産業技術総合研究所では2008年から「イノベーションスクール」と名付けたポストドク人材の育成プログラムを実施している[8]。これは、博士号を持つ若手研究者を産総研特別研究員として受け入れ、特定の専門分野について科学的・技術的な知見を有しつつ、より広い視野を持ち、異なる分野の専門家と協力するコミュニケーション能力や協調性を有する人材として育成することを目指している。イノベーションスクールでは、基礎研究から製品化研究までをカバーする「本格研究」に必要な各種講義や演習だけではなく、産総研の人材育成に協力してくれる企業の現場における実践的なオン・ジョブ・トレーニング(OJT)などを通じて、企業をはじめ社会の様々な重要な場で即戦力として活躍できる人材を輩出させ、社会的なニーズと有用な人材のミスマッチを解消することに寄与している。

(3) JAXA 宇宙科学における実践例

日本の宇宙科学は、歴史的経緯もあり、世界でもユニークな「大学共同利用システム」による進め方を有する[9]。大学レベルでは持てない研究基盤を拠点に集め、コミュニ

⁷ 数人の受講者がチームを作り、複合的な視点を含む現実的課題の解決にあたることを通して、自分たちはどのような知識・情報を持っているのか、必要な情報をどうやって獲得し、それらをどう活用し課題解決にあたるかを自律的に学ぶ教育手法。このプロセスを通して、コミュニケーション力やリーダーシップ等を学ぶことも期待される。ここでは、指導者は助言者（ファシリテーター）として、学ぶ環境の提供や要求に対して情報を提供するなどサポーターとしての役割を果たす。

ティに属する研究者が一体となってこれを利用した研究を行う。このシステムにおいて、ロケットや科学衛星が宇宙科学での対象「研究基盤」である。JAXA 宇宙科学研究所では、大学院生が直接的に実際のロケットや衛星の設計、開発さらに運用にも携わる。学術研究の成果という意味でアカデミアの顔を持ち、実際の開発現場である点で産業界に近く、かつ複数学術分野の総合的かつシステムの理解を要求するのが「宇宙科学」であり、大学共同利用システムと大学院教育が一体化された現場は、典型的な複雑系人材育成の場と言える。宇宙科学研究所は、東京大学、総合研究大学院、および他大学所属の特別共同利用研究院学生の3つのシステムを利用して、大学院レベルの人材育成を進め、その多くは宇宙開発の中核となるとともに他の産業分野にも進んでいる。

(4) 従来の教育システム、人材育成プログラムの課題

現時点でシステム創成力の強化が比較的意識されている事例をいくつか取り上げケーススタディしたが、本章のはじめに述べたように俯瞰型あるいは俯瞰力養成を謳う人材育成プログラムは多く、これらの成果の概要は文部科学省や経済産業省、JST のホームページに掲載されている。また、それぞれのプログラムにおいて、国内インターンシップ・国際インターンシップ、産学連携共同研究、国際シンポジウムの参加、PBL、副専攻・副指導教員制など様々な取り組みが行われている。しかし、これらを横断的に眺めてみると、現在の人材育成プログラムには次に述べるようないくつかの共通的な課題が浮かび上がってくる。

- ① 競争的資金のもとで行われるものは、大体3～5年の時限付き人材育成プログラムであり、そこで行われた人材育成に関する創意工夫は必ずしも普遍化されていないし、各プログラムの枠を超えて外に波及するという状況にもなっていない。すなわち、資金的援助が得られるプロジェクト実施期間中はそれぞれにベストを尽くすものの、その後、内部資金だけで恒常的なシステムにすることは極めて困難な状況である。プログラム終了後どうなったかをファンディング・エージェンシーは自己評価すべきであろう。
- ② 各プログラムの枠を超えて外に波及するという状況になっていないということに関しては、そもそも競争的資金への申請時には、プログラム毎の独自性を出すことが求められ、他のよい実践例に倣うという方向性は取られにくい構造となっている。
- ③ 俯瞰力やシステム創成力の強化を目指し、試行錯誤的に各機関が人材育成を行っているが、多くの場合、第20期提言[1]で出された産学官連携の俯瞰型人材育成プログラムという観点から見ると、体系だったデザインという点からは不十分である。
- ④ 学生の視点に立つと次のような課題もある。博士課程の学生には、博士課程の研究・論文執筆という主目的があり、昨今の競争的な環境においては一流ジャーナルへの論文投稿につながる高い研究成果を求められている。一方で、追加的にこ

うした総合力を磨く教育に参加するのは、かなりの負荷となる。

- ⑤ こうした教育における重要な手法として、PBL が様々な形で取り組まれている。しかし、PBL は実践プロジェクト的テーマを扱いつつも、成功しても利益をもたらさず失敗してもリスクを伴わないため、実社会におけるプロジェクトやビジネスのような真剣勝負にはならないので、教育効果という点からはある程度限界がある。また PBL を実施すると、一人がリーダーシップをとり、全員にリーダーシップを体験させることが難しいという課題もある。
- ⑥ リーダーシップ養成に際しては、学術におけるリーダーシップと産業界におけるリーダーシップは区別すべきであり、また、産業に役立つ人材を育てるということと、産業界におけるリーダーシップを育てることも区別して考える必要がある。産業界のリーダーには高い識見、創造力、洞察力と総合力、組織力が必要であり、若手のリーダーをいかに育成するかも課題である。

(5) 俯瞰力と俯瞰型人材育成に関するアンケート分析

(4)節で述べたように、人材育成を考えると、どうすれば実社会に見られるような真剣勝負の場で教育あるいは人材育成ができるかという視点はとても重要である。産学における優れた実践者がその能力を培ってきた、長期にわたる経験をロールモデルとして圧縮して、人材育成プログラムに取り込むこと、ができないだろうか。また、真剣勝負の実践的体験の場を、課題解決型の研究プロジェクトに人材育成プログラムを内包させることは、俯瞰型人材育成に大きな効果をもたらすことが期待される。そこで、この論点をより深く検討するために、第20期、21期分科会メンバーにアンケート調査を行い、「俯瞰力」の重要構成要素の抽出と、「俯瞰力」を身につけるに至った重要な経験や教育プロセスの調査、実効性のある「俯瞰型人材育成」に必須の事項の抽出を試みた。その結果は以下のようにまとめられる。

俯瞰力の重要構成要素

必要となる知識を収集する能力と論理的思考力を有し、アナリシスやシンセシスの対象となるものや現象をシステムとして捉え、技術的なことだけでなく社会のニーズや長期的な影響にまで考慮し、システムの構成要素を抽出し、システムと構成要素の静的、動的関係を適切に抽象化できる力。

俯瞰力を身につけるに至った重要な教育経験、社会体験の例

大学院博士課程や企業においてコアとなる専門分野を確立する教育を受けつつ、並行して、あるいはある程度確立した後に、異なる分野の専門家や非専門家と強く関わりながら実施された共同研究体験、社会的課題解決型プロジェクトへの参加体験、トラブル対応体験と、その体験を終了後に改めて分析・抽象化した体験。これらの体験には、技術的側面のみならず、期限や予算などの社会・技術的制約の克服も含まれる。

実効性を伴う俯瞰型人材育成プログラムに必須の要件

科学的手法に支えられた強いアナリシス力と、多様な視点を統合する方法に支えられたシンセシス力の両方を学ぶものであること。多様な視点を統合するために、論理的な討論と統合化を訓練すること。そのために、良好な（必要、有用、複雑・困難な）システム開発の経験を経ることが必要であり、例として、大型プロジェクトへの参加、課題解決型プロジェクトの遂行などがある。PBL を体験させる場合には産業側の参加を促し適度に困難な問題設計に対する真剣な取り組みを強制するものであること。このような体験をボトムアップ的に行うだけではなく、シンセシス理論をトップダウン的に教育し、その体験を分析することが必要である。また、学習途中でも何らかの進展が認められていることを自己評価する方法を確立すべきである。いうなれば、教育（人材育成）と研究（技術革新）とイノベーション（社会経済価値創造）の3要素を三位一体的に推進する教育・研究体制とカリキュラム化が必要である。

(6) 産学官連携の俯瞰型人材育成における必須の要件

(5)節の結果は、アンケートを通して得られた個人の体験から引き出される主観的なイメージであるが、ここから共通して、産学官連携の俯瞰型人材育成における必須の要件として次の項目が浮かび上がる。

①自分自身のコアとなる専門分野を確立しつつ、②異なる分野の専門家あるいは非専門家と協調・対峙しながら、③新規システムの創成に取り組むシンセシス体験や社会的課題解決に取り組むなどの④真剣勝負の体験をすること。さらに、そうした経験を、断片的に記憶するのではなく、⑤その都度、理論や思索と重ねながら、自分の中に俯瞰力として体系化していくこと。

以上の検討の結果、産学官連携の俯瞰型教育システムとしては、第一に、認識科学と設計科学の両面を学ぶ実践型教育である必要がある。具体的には、複数の視点を持つ多様な専門分野に関わる課題解決型プロジェクトに参加する体験、その体験と並行してシンセシスの理論や科学歴史として、俯瞰型統合型学術や分野融合の学術の事例を学ぶプログラムが有効であろう。また、社会的問題を解決する課題解決型プロジェクトの中に、学術的な本質を掘り下げる作業項目を入れ、研究プロジェクトの中において同時に人も育てるというアイデアも有効であろう。ただし、こうしたプロジェクトに学生を放り込み体験させるだけでは不十分であり、体験終了後に認識科学あるいは設計科学の観点からその体験を分析することが重要である。

第二に、実社会におけるプロジェクトやビジネスのような真剣勝負となるような仕組みをどういう形で実装するかという点である。たとえば、テーマ設定法や種々の制約をつけること、あるいは実行にあたっての経済的インセンティブを与える仕組みなどが考えられよう。そもそも博士課程学生の研究は学術的、社会的価値を有しており、本来であればその行為そのものが経済的価値につながる。また、課題解決型研究プロジェクトや産学連携の共同研究に参加することは、その成果が経済的価値に直結するものでもある。しかし従来、博士課程のプロセスは経済的対価の対象とはなっておらず、経済的イ

ンセンティブをもっと効果的に活用すべきであろう。なお、教育というどうしても大学にのみ注目しがちであるが、大学院の課程はシステム創成力を養成するきっかけでありスタートラインと認識したうえで、実社会における活躍時期もシステム創成力を磨く時期として重要であると認識し、産学官が連携して人材育成に関わるのが重要である。

6 巨大複雑系社会経済システムの創成力に関する評価基準

巨大複雑系社会経済システムの創成力を強化するにあたっては、これらのシステムの存在を正確に分析し理解するための、いくつかの深い専門能力（アナリシス力）と同時に、システム全体の俯瞰力、その上でシンセシスや共創を実現するための力（シンセシス力や共創力）の評価基準の開発が求められる。

そもそも科学は客観的なものであると認識されており、評価基準も客観的な評価基準作りが指向されてきた。人工システムは、環境（自然、社会）と人間の構成する舞台において、所与の環境において作動し機能を発現することにより、人間の効用を満たすことにより、当該システムの社会的・経済的価値が生み出され、評価される。このため、工学においても、時代の中で新しい技術や人工システムが社会に与える影響について、リスクも含めて、客観的に説明することが求められる。

アナリシス力強化に関しては、このような客観的な評価基準で測りやすい。たとえば、世界一、新規性、過去の成果（論文実績）、3年～5年のスパンでの短期的成果、目標と成果の明確さ、および定量性などが評価基準となろう。

一方、第3章で議論したように、巨大複雑系社会経済システムに関わる価値とは、認識という行為の対象としてではなく、人工システムの創成という当為を通して生みだされる価値、すなわち経済的価値、社会的価値、文化的価値である。すなわち、巨大複雑系社会経済システムの影響には、経済的価値の市場的普及、機能的価値の社会的受容、知的価値の文化的波及がある。人工システムそれ自体では価値を生み出さない。人工システムは、環境（自然、社会）と人間の構成する舞台にいわばプレーヤーとして登場し、それらと相互作用することにより価値を生み出す。人工システムは、環境において作動し機能を発現し、人間の効用を満たし、社会的、経済的価値を創成しなければ、単に人工的なモノでしかない。

システム創成力の構成要素の4つの力の中でも特に俯瞰力やシンセシス力、共創力については、このような様々な価値に関係するため、客観的に評価しにくい側面を持っている。むしろ、主観的な価値として評価できるとも言える。巨大複雑系社会経済システムは、社会の中に位置づけられて、はじめて価値が生まれる。逆にいえば、まだ緒についたばかりの時期に、その予想される成果に関して客観的な評価を要求されると、それに適切に応えることができず、先に進める可能性が潰えてしまう。巨大複雑系社会経済システム自身やその創成に関する研究、あるいは創成力強化のための人材育成プログラムには、学術的にはまだ緒についたばかりであっても強い社会的ニーズや産業的なニーズがある場合も多い。従って、学術的に緒についたばかりのテーマであったとしても、将来の発展に対する客観的な説明根拠がしっかりしていれば、たとえば境界領域研究、新学術領域研究、あるいは政策誘導型研究プロジェクトとして提案して、育てていく発想があってもよいであろう。そのような研究プロジェクトとして育て、学術として成熟してくるものであれば、客観的な評価にも耐え生き残っていく、そのような将来の価値創成力に着目し育てる視点をもった評価基準を構築すべきである。

7 社会経済システム研究・課題解決型研究の現状と強化に向けた方策

巨大複雑系社会経済システムは人々の豊かな生活、安全・安心な生活に不可欠であると同時に、それらに関する技術、産業の優位性、さらには新しいシステムの創成力が国や企業の存続、発展を大きく左右する。従って、我が国発の世界標準となるシステムを創成すること、およびその創成力を高めることが、わが国の大きな課題である。そのため、産官学が一体となって、①我が国発のシステムの研究開発に取り組むことと、②システムを生み出し実用化・標準化する力を養成する環境を整えること、を意識的かつ強力に進める必要がある。前者としては、課題発見と早期かつ組織的取り組みが、また、後者としては、人材育成、基礎研究、プロジェクト選定・推進の文化の創造と定着、およびそれらに対する戦略的なファンディングが求められる。

(1) 国の施策、ファンディングの現状と課題

巨大複雑系社会経済システムの研究に対する国の施策、ファンディングなどは次のような状況にある。

教育研究機関に対する基礎的ファンドである科学研究費補助金などでは、1テーマあたりの予算規模の制約もあり、巨大複雑系社会経済システムに関わる研究は少なく、取り上げられているものも要素技術に類するものが多い。「特定推進研究」や「特定領域研究」なども、基本的に、ひとりないし数人で行う研究が主対象であり、また、研究テーマも現在は現象解明、分析、要素技術開発などのアナリシス型研究がほとんどであるが、研究期間が数年間、総額が数億円単位と比較的大きな研究が可能ともあり、シンセシスやシステム設計などに関する研究を増加させることが可能と思われる。

他のファンドとして、「融合研究」、「俯瞰型研究」などがあり、特に、第3期科学技術基本計画の発足以降、課題解決型プロジェクトを対象とした、これらのファンディング事業が増えつつある。さらに、第4科学技術基本計画[4]では、「グリーンイノベーション」と「ライフイノベーション」という、社会・経済ニーズに応えようとするテーマが前面に掲げられ、課題解決型の研究を強化する方針が打ち出された。巨大複雑系社会経済システムは、社会的課題を解決するために開発されるものが多いため、結果的に、システム研究が強化される可能性がある。この方針の具体化と着実な実行が望まれる。

国が主導している巨大複雑系社会経済システムの開発例としては、次世代スーパーコンピューター、X線自由電子レーザー、海洋地球観測探査システム、高速増殖炉サイクルシステム、宇宙輸送システムなどの国家基幹技術がある。これらは総合科学技術会議で選定されたものであるが、通常は、それぞれの分野における重要性や必要性の評価に基づいて提案され、選定され、推進される形になっている。またその開発は、公的研究機関と企業が中心となっており、大学の参画は補完的、限定的である。

一方、人材育成のファンディングにおける国の現状は次の通りである。

現在、我が国では、巨大複雑系社会経済システムの多くが国の研究機関（独立行政法人）、企業、政府、地方自治体などを中心に開発されており、人材育成はその開発現場

でオン・ジョブ・トレーニング、オン・リサーチ・トレーニングなどの形で行われている。しかし、これらのプロジェクトの選定・推進は、人材育成などのシステム創成力の強化という視点で行われるわけではなく、技術体系の整備を目的にしているわけでもない。また、開発現場での成果・経験が人材を育成する大学などの教育現場に反映される機会が十分とも言えない。これらの改善が課題であろう。

人材育成という観点からの課題はおおよそ次のように整理される。①原子力分野などを除き、大規模なシステム研究、シンセシス研究はほとんどない。②この分野の人材育成は、単なる理論教育だけではなく、開発に携わる経験を積ませることが重要であるが、そのための組織や施設はほとんどない。③育成された人材の主な受け皿となる企業の協力（人材ニーズの明示、教育プログラムの構築、施設の提供、現場への学生・研究者の受け入れなど）が十分ではない。④創成力についての学術・教育体系が未熟であるため講座の設定が困難であり、学術的成果の創出・発表の場が少なく、高い評価を得ることが困難であり、また、資金、設備、教官・研究者などが不足している。

(2) 社会経済システム研究・課題解決型研究の強化に向けた方策

多くの研究者を擁し、高等教育の中心をなす大学のシステム研究と人材育成における役割はきわめて重要である。他方、システム開発に必要な能力を身につけるには、学術大系の整備による系統的な理論教育と共にプロジェクト参画の経験が有効である。マネジメントを経験して初めて広い視野が出てくることもある。できれば大学においてそのような経験を積むことが望ましい。

先に、巨大複雑系社会経済システムに関する大学における研究やそのための国のファンドがきわめて少ないことを述べた。大学での研究例がないから「公募・採択対象としない」のか、「公募・採択対象とされない」から「応募がない」、「研究がない」となるのかという議論もある。いずれにしろ、「ファンドがあったとして大学で研究が始められるか。どのようなファンドなら可能か」と言う疑問に答えること、すなわち、大学で研究が行える環境を整える必要がある。

巨大複雑系社会経済システムを真正面から取り上げ研究を行う大学は、それほど数を必要としないし、また国内に多数設置することは、費用、指導者数および育成された人材の受入数などから見て無理であろう。従って、単独の大学が取り組むケースのほか、複数の大学が連携して取り組むケース、大学と公的研究機関や企業が連携して取り組むケース、海外の機関と連携するケースなどがあり得よう。文部科学省の平成 23 年度予算で取り上げられた「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス事業」は複数大学の連合を、「緑の知の拠点事業」は省庁連携による大学支援を志向している。このような流れを強化する必要がある。ただし、それを実施する側にも課題がある。大学や教員は、ボトムアップ型の教育・研究、フラットな組織という文化が一般的であるが、このような教育・研究を実効のあるものにするには、各大学・研究者をフラットに構成するのではなく、主体となる機関と協力する機関とを分け役割を明確にすること、強力なリーダーとそのスタッフを確保することなども必要であろう。

大学や公的研究機関のシステム創成力の強化や人材育成のためには、ファンド事業において、国家基幹技術ほどは大型でない、中小規模の重要システムの開発を増やし、大学や公的研究機関も参画できるようにすることも有効と思われる。また、国家基幹技術のような大型プロジェクトで若手に経験を積ませ育成をはかることも重要であろう。そのためには、プロジェクトの中に教育予算を組み込む、博士課程の学生やポスドクを参加させる、プロジェクトの選定時の評価項目に「システム創成力の強化」を加えるなどの方策が考えられる。

また、開発リーダーには高い識見、創造力、洞察力と総合力、組織力が必要であるが、そのような人材、およびそれを育成する人材が不足している。たとえば、社会経済システムは、開発者、提供者とユーザー、さらには市民・国民とのインタラクションによって開発されるなど、組織内だけでは開発が困難なケースが多い。この能力の強化なども大きな課題である。

8 巨大複雑系社会経済システムの創成力強化のための提案

第1章に示したように、本報告では、第20期分科会よりの提言「巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて」における提言の内容をさらに具体的化するために、どのような取り組みが求められるかについて検討を行った。前章までの議論を踏まえた上で、本報告では以下の提案を行う。

(1) 行政、科学者コミュニティ、大学、産業界への提案

巨大複雑系社会経済システムの創成に関わる研究開発については、経済的価値、社会的価値、文化的価値の普及戦略と一体化した研究開発推進が必要であり、産学官連携さらには文理融合の価値共創型オープンイノベーションを目指すこと。

強い社会的ニーズや産業界からのニーズがあり、将来の発展に対する客観的な説明根拠がしっかりしていれば、学術的には緒についたばかりであっても、たとえば境界領域・新学術領域の政策誘導型研究プロジェクトとして採択して育てていけるような「俯瞰力、シンセシス力、共創力」の評価基準を構築すること。

(2) 行政への提案

提案(1)において得られる「俯瞰力、シンセシス力、共創力」の評価基準をもとに、関連する研究プロジェクトの採択を促すこと。実効ある俯瞰型人材育成プログラムとするためには、認識科学と設計科学の両面を学ぶ真剣勝負の実践型教育となるように、多様な視点・専門分野が関わる課題解決型プロジェクトに、人材育成プログラムを組み込むこと。また、課題解決型プロジェクトとしては、国家基幹技術のような大型プロジェクトに加えて、中小規模の重要システムを対象とするプロジェクトも増やし、大学や公的研究機関が主体的に参画できるようにすること。

(3) 科学者コミュニティへの提案

研究プロジェクトに関しては、社会経済的価値増大にとっては、新機能開発や高品質達成だけではなく、ネットワーク環境下での市場普及や社会受容、さらに文化的波及を見据え、境界不定環境下のロバスト設計のような巨大複雑系社会システムの創成に特有の学術研究に積極的に取り組むこと。

(4) 大学への提案

提案(1)の実効ある俯瞰型人材育成プログラムに取り組む際に、課題解決型プロジェクトへの参加等を促すボトムアップ的な教育に加えて、シンセシスの科学や価値創成の理論を体系化しトップダウン的に教育するとともに、テーマ設定、種々の制約（成果・期間・費用など）、経済的インセンティブ、に関する工夫などを施し、真剣勝負となる仕組みを実装すること。

また、巨大複雑系社会経済システムの創成に関する研究を、大学を中心として行える

環境を整えること。そのために、単独の大学が取り組むケースのほかに、複数の大学が連携して取り組むケース、大学が他の公的機関や企業と連携するケースも想定し、主体となる機関と協力する機関の役割も明確にしながら進められるようにすること。

(5) 産業界への提案

社会と産業界は、上記の教育を受けた人材を積極的に雇用し、処遇すること。また、大学および研究型独立行政法人と積極的に連携して、そうした人材育成プログラムに参加・貢献すること。併せて、本提案に沿って行われる諸研究と開発の成果を、自らが作り出す巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に活用するとともに、そのプロセスに上記の大学と連携した人材育成プログラムも組み入れること。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島原子力発電所の事故に学ぶべき教訓と、その教訓の全世界に稼動する 435 基以上および建設設計画中の原子力発電所に向けた早期の反映の緊急性を鑑みると、以上の提案の実効ある実現は産業と学术界と行政が一体となって緊急に取り組み、同時に国民的コンセンサスと他の社会経済システムへの水平展開を構築すべき重要課題である。

<参考文献>

- [1] 日本学術会議総合工学委員会 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会、
提言「巨大複雑系社会経済システムの創成力強化に向けて」、2008年6月26日.
- [2] 日本学術会議、「日本の展望—学術からの提言2010」、2010年4月5日.
- [3] 日本学術会議日本の展望委員会 理学・工学作業分科会、「日本の展望—理学・工学からの提言」、2010年4月5日.
- [4] 総合科学技術会議、「科学技術に関する基本政策について—第4期科学技術基本計画策定に向けて」、2010年12月24日
- [5] 東京大学工学部システム創成学科・大学院工学系研究科システム創成学専攻の教育、
<http://www.si.t.u-tokyo.ac.jp/> および <http://www.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>
- [6] 東京大学グローバル COE プログラム「機械システムイノベーション国際拠点」、
<http://www.mechasys.jp/>
- [7] 東京大学グローバル COE プログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」、
<http://www.n.t.u-tokyo.ac.jp/gcoe/jpn/>
- [8] 産業技術総合研究所イノベーションスクール、
<http://unit.aist.go.jp/inn-s/ci/index.html>
- [9] JAXA、<http://www.jaxa.jp/>

<参考資料 1> 総合工学委員会巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会審議経過

平成 20 年

- 11 月 18 日 分科会（第 1 回）
分科会の焦点について

平成 21 年

- 2 月 9 日 分科会（第 2 回）
審議の進め方、ヒアリング候補について
- 3 月 30 日 分科会（第 3 回）
日本学術振興会との意見交換、タスク分担について
- 6 月 1 日 分科会（第 4 回）
ケーススタディ報告、タスク検討状況報告
- 9 月 18 日 分科会（第 5 回）
タスク検討状況報告

平成 22 年

- 3 月 16 日 分科会（第 6 回）
人材育成プログラムヒアリング、タスク検討状況報告
- 5 月 20 日 分科会（第 7 回）
タスク検討状況報告、活動のまとめ方について
- 7 月 29 日 分科会（第 8 回）
タスク検討状況報告、公開シンポジウム企画について
- 9 月 13 日 分科会（第 9 回）
公開シンポジウム企画最終案、対外報告のまとめ方について
- 11 月 16 日 分科会（第 10 回）
対外報告について
- 11 月 16 日 公開シンポジウム「巨大複雑系社会経済システムとその価値創成力を考える ～ 科学技術駆動型イノベーション創出力強化に向けて ～」

平成 23 年

- 3 月 7 日 分科会（第 11 回）
対外報告案について

<参考資料2> 人材育成の実践例

1. 東京大学工学系における実践例

東京大学工学部・工学系研究科には総合工学を標榜する学科・専攻が複数存在していたが、その中の4学科（船舶海洋工学科、システム量子工学科、地球システム工学科、精密機械工学科）が、工学知を基盤としつつ俯瞰的な観点から革新的システムを創成できる人材を養成することを目的として、2000年にシステム創成学科を設立した。さらに、大学院レベルにおけるこの分野の発展を目指し、2008年に、環境海洋工学専攻、システム量子工学専攻、地球システム工学専攻を改組し、システム創成学専攻が設置された。その折に同時に改組された原子力国際専攻と技術経営戦略学専攻は、工学系研究科の中でシステム創成系の専攻群として、基盤となる教育理念を共有し教育に当たっている。東京大学システム創成学の教育目的は、俯瞰的視点とシステム思考に基づき戦略的に意思決定を行う能力、特定専門分野におけるアナリシス能力を備え、俯瞰的視点から先端的要素技術の開発ができる人材、革新的なシステムの創出ができる人材の養成である。その実現に向けて、基礎分野のディシプリンの確立と俯瞰的、分野独立的なシステム創成学をバランスよく学べるように、システム創成学を構成する重点分野に関連する先端的知識や領域によらない基盤的知識に関する講義群に加えて、専門としたい工学基礎分野を学生が自主的に選択して主体的に学ぶ基礎学理演習や、俯瞰的、分野独立的な思考法や実践的適用能力を習得することを目的とした応用演習等を用意している。

博士課程を中心とした人材育成については、東京大学大学院工学系研究科のすべての専攻、学科が関わる7つのグローバルCOEプログラムが進行中である。その中から、特に2つのGCOEプログラムをとりあげケーススタディした。

21世紀COEプログラム「機械システムイノベーション」の後継として2008年から、グローバルCOEプログラム「機械システムイノベーション国際拠点」がスタートしている。同プログラムでは、ナノ空間の現象がマイクロ空間に展開する融合領域を拡張ナノ空間と呼び、それを活用した革新的な機械システムの創成と学問・技術体系の構築を目標として、応用化学、化学システム工学、精密工学、機械工学、産業機械工学、航空工学、システム創成学、マテリアル工学の8専攻が参加し進められている。GCOEプログラムでは研究そのものよりも博士課程人材の養成を主目的に活動しており、上記プログラムでは、人材の能力の構成要素を、①基礎力（自然科学と人文社会科学の基礎）、②専門力（機械工学に関する専門知識と技術・社会・環境に関する俯瞰的知識）、③リテラシー（言語力、情報リテラシー、技術リテラシー、法制リテラシー）、④コンピテンシー（創造力、課題設定解決力、遂行力、自己管理能力、チームワーキング、リーダーシップ、責任感、使命感）の4種類と考え、工学と社会とを俯瞰することのできる能力の涵養、国際性と深い専門知識とに基づいた競争力の涵養、産業界・学术界で活躍するためのリーダーシップの涵養、を目標として活動を行っている。具体的には、境界領域・フロンティア領域のカリキュラム化、イブニングセミナー、国内インターンシップ・国際インターンシップ、海外派遣・招へい、国際サマースクール、専攻横断型PBL(Project Based Learning)講義、国際シンポジウムの

企画・運営・参加、主指導教員・副指導教員制度などを通して、人材育成に取り組んでいる。たとえば、専攻横断型 PBL では、産業界や学内から提示された新技術開発テーマに関して、異なる専攻・専門の学生 5、6 名からなるチームを編成し取り組んでいる。1 つの施策だけで先にあげた 4 種類のそれぞれの能力が養われるとは考えられないことから、複数の施策を組み合わせるようによく養っていけるように考え実践している。

原子力系のグローバル COE プログラム「世界を先導する原子力教育研究イニシアチブ」では、エネルギーや放射線応用のベースとして、全体を包含しうる原子力社会学を定義している。人文社会科学を含め、社会のための技術、科学をどのように進めていくべきかという観点で工夫し、法律と技術の関連付けである法工学、核不拡散、地域住民とのパブリックコミュニケーションなどを中核に置いて人材育成を進めている。また、IAEA(International Atomic Energy Agency)などでの国際インターンシップ、国際ワークショップ、サマースクール、海外武者修行、海外セミナー、海外拠点連携講義など、を通して国際的な視野を広げる活動も積極的に行っている。今後さらにシステムの複雑性の克服、大量データの取り扱い、人間の心理・行動の理解、進化・変異への対応が課題である。

グローバル COE は 5 年間のプログラムであるので、上記のような取り組みを専攻レベルでの定常的な教育にフィードバックする仕組みをどう作っていけるかが研究科・専攻の共通の課題である。俯瞰的視点を入れ、あるいは技術開発や新規システムの創成を行う観点からカリキュラムの改編を進めている。また、博士人材を含めて教育の効果をきちんと出していくことが求められており、システム創成力の基盤を持っている学生を社会とのインタラクションの中で具体的に育成するときに、アカデミアの発信力だけでは不足であり、産業界側との連携も重要である。

2. 産業技術総合研究所の実践例

産業技術総合研究所では 2008 年から「イノベーションスクール」と名付けたポストドク人材の養成プログラムを実施している。これは、博士号を持つ若手研究者を産総研のポストドク（産総研特別研究員）として受け入れ、特定の専門分野について科学的・技術的な知見を有しつつ、より広い視野を持ち、異なる分野の専門家と協力するコミュニケーション能力や協調性を有する人材として育成することを目指している。産総研がこうした人材育成に取り組むのは、昨今、高度なポストドク人材が十分活用されていない一方で、人材不足が言われており、そのミスマッチを何とか解決したいと考えているからである。

イノベーションスクールでは、基礎研究から製品化研究までをカバーする「本格研究」に必要な各種講義や演習だけではなく、産総研の人材育成に協力してくれる企業の現場における実践的なオン・ジョブ・トレーニングなどを通じて、企業をはじめ社会の様々な重要な場で即戦力として活躍できる人材を輩出させ、社会的なニーズと有用な人材のミスマッチを解消することに寄与している。イノベーションスクールの基本的な考え方は、大学・企業と産総研が協力し、産学官で研究を経験し、それぞれの研究現場と文化を理解し、企業、大学、産総研等の多様な分野で活躍する人材を育て、イノベーション創出に貢献する、というものである。企業とスクール生のマッチングをスムーズにするために、産総研と企

業間の覚書締結（保険、機密保持など）を交わしている。

3. JAXA 宇宙科学における実践例

日本の宇宙科学は、歴史的経緯もあり、世界でもユニークな「大学共同利用システム」による進め方を有する。大学レベルでは持てない研究基盤を拠点に集め、コミュニティーに属する研究者が一体となってこれを利用した研究を行う。このシステムにおいて、ロケットや科学衛星が宇宙科学での対象「研究基盤」である。これに関連して、宇宙科学の拠点である JAXA 宇宙科学研究所では、大学院生が直接的に実際のロケットや衛星の設計、開発さらに運用にも携わる。ロケットや衛星は、それ自体が複雑システムであり、探査機「はやぶさ」からもわかるように、事前のリスクや故障可能性の想定、想定できなかったトラブルへの即座対応など複雑システムに共有する課題を抱える。学術研究の成果という意味でアカデミアの顔を持ち、実際の開発現場である点で産業界に近く、かつ複数学術分野の総合的かつシステム的な理解を要求するのが「宇宙科学」であり、大学共同利用システムと大学院教育が一体化された現場は、典型的な複雑系人材育成の場と言える。

宇宙は、それ自体が挑戦的かつ冒険心に満ちたもので、一般の方の関心も高い魅力的な研究対象である。宇宙科学研究所は、東京大学、総合研究大学院、および他大学所属の特別共同利用研究院学生の3つのシステムを利用して、大学院レベルの人材育成を進め、その多くは宇宙開発の中核となるとともに他の産業分野にも進んでいる。宇宙科学に留まらず、巨大複雑系社会経済システムが必要とするシステム創成力を持った人材育成の場が多数作られることが期待される。

<参考資料3> 俯瞰力と俯瞰型人材育成に関するアンケートと回答例

1. 俯瞰力及び俯瞰型人材育成に関するアンケート

日本学術会議 総合工学委員会 巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会では第20期活動において提言をまとめ、その中で巨大複雑系社会経済システムの創成力の構成要素として、アナリシス力に加えて、俯瞰力、シンセシス力、共創力を抽出した。また、創成力強化のための人材育成および制度設計という観点から、巨大複雑系社会経済システムを対象とした認識科学と設計科学の連携を可能とする産学官連携の俯瞰型人材育成プログラムを設定し、組織・分野を超えた行動を起こすことを提言した。

第21期の活動においてはその提言を具体化すべく検討を進めており、その活動の中で、「俯瞰型人材育成」とはどのようなものであり、どう進めるべきかについて調査検討を進めてきた。これまでは、大学や公立研究機関等で行われているいくつかの人材育成プログラムの調査・分析を中心に進めてきた。今回、その活動の一環として、20期、21期の当分科会委員を中心として、俯瞰力及び俯瞰型人材育成に関するアンケートを実施した。アンケート項目は次の通りである。

(1) 「俯瞰力」とはどのようなものであるか

巨大複雑系社会経済システムの創成力の重要構成要素として、20期の分科会活動において「俯瞰力」が挙げられました。この文脈における「俯瞰力」とは、より具体的にはどのようなものと考えますでしょうか。あなたの考える「俯瞰力」について、それを構成するより具体的な構成要素を、複数のキーワードで表現いただくか、数行で定義してください。

(2) 「俯瞰力」をどのようにして身につけたか

あなたがご自身の俯瞰力を身につけるに至った重要な経験ないし重要な教育プロセスはどのようなものであったでしょうか。①時期、②具体的な経験内容、あるいは③受けた教育内容について、数行で結構ですのでお答えください。なお、複数ある場合には、(A)初期の経験／教育プログラムと(B)最も重要な経験／教育プログラムの2つについて、それぞれお答えください。

(3) 「俯瞰型人材育成」において必須の事項、実施上の課題とは何か。

俯瞰型人材育成を謳う人材育成プログラムは散見されますが、実効を伴うものは少ないように思われます。実効を伴う「俯瞰型人材育成」に①必須の要件、ないし②具体的な方法とは何だと思われますか、複数キーワードや箇条書きで結構ですので、お答えください。また、③実施する際の課題についてもお答えください。

2. 俯瞰力及び俯瞰型人材育成に関するアンケートの結果例

(1) 俯瞰力の具体的なイメージ

- ・対象の外縁を考慮しつつ、対象と要素間関係とを正しく抽象化する力。
- ・目的、環境（制約）条件、リソースなどを勘案し、最適な計画の立案と行動がとれる力。
- ・知識あるいは知識を集める能力と論理的思考力を有し、リーダーシップ・フォロワーシップがとれる能力。
- ・クラス I、II、III の人工システムのそれぞれに対する仮説形成力。
- ・技術的なことだけでなく、社会のニーズや長期的な影響にまで配慮する思考力。
- ・俯瞰力＝アナリシス力×シンセシス力。 俯瞰力＝幅広い工学素養×工学マネジメント素養×メタ・ナショナル素養。
- ・解析や評価、設計の対象となるものや現象をシステムとして捉え、その構成要素が何であるか、さらに構成要素間のおおよその関係（静的な関係のみならず動的な関係も含む）を認識する力。

(2) 俯瞰力を身につけるに至った重要な教育経験、社会体験の例

- ・卒論・修論・博論と進める段階で俯瞰的にみなければいけないという事実気付いた。優れた先人との議論や本を通して学んだ。
- ・専門性の異なる人々と交わした相手の領域の問題に関する議論。
- ・極度に専門的なことを規制当局などや非専門家へ説明した経験。
- ・交換留学経験。
- ・シンセシスを意識した教育・研究の経験。
- ・企業における一定の分野の専門性を備えた人間とみなされ、異なる専門家たちとトラブル対応プロジェクトに参加した体験。
- ・専門分野の異なる研究者との共同研究実施体験。その際、コアとなる自分の専門をしっかりと身につけ、そこを基軸として、いろいろな分野に興味を持つ体験。
- ・博士課程時代に認識科学的研究と並行して、社会の求める技術的課題の解決に参加した経験。これを通して複眼的素養を身に付けた。ここでは、技術的側面のみならず、期限や予算などの社会・技術的制約の克服も含まれた。
- ・産業界での OJT。原子力発電システムの様々な不適合事情に対応した体験。

(3) 実効性を伴う俯瞰型人材育成プログラムに必須の要件のイメージ

- ・科学的手法に支えられた強いアナリシス力と、多様な視点を統合する方法に支えられたシンセシス力の両方を学ぶこと。多様な視点を統合するために、論理的な討論と統合化を訓練する。ただし、学習途中でも何らかの進展が認められ

- ていることを自己評価する方法を確立すべきである。
- ・一つのことを極める（極めたと思うところまでやりぬく）こと。
 - ・良好な（必要、有用、複雑・困難な）システム開発の経験を経ること。例として、大型プロジェクトへの参加、課題解決型プロジェクトの遂行などがある。
 - ・PBLなどのボトムアップ型教育を推進することと並行して、シンセシス理論をトップダウン的に教育すること。
 - ・適度に困難な問題設計に対する真剣な取り組みを強制するPBLを行うこと。たとえば企業から問題を与えられ、オブリゲーション（期間・成果・費用）を与える。
 - ・博士課程の学生が、企業や公的研究機関が実施する国のプロジェクトメンバーとして一定期間、特定の研究開発項目に参加すること。大学院教育・研究における主専攻と副専攻プログラム群への参加。ただし、座学でなく実学を伴うこと。さらに、認識科学と設計科学の連動を必要とするカリキュラムであること。
 - ・大学院教育・研究における大学院生向け経済的支援が、社会的契約を伴う「活きた金」であること。
 - ・複数教員による組織的大学院教育体制と、産業側の参加・貢献が必須。教育（人材育成）と研究（技術革新）とイノベーション（社会経済価値創造）の3要素を三位一体的に推進する教育・研究体制とカリキュラム化。
 - ・複数の専門分野・専門家が関わらねばならない真剣勝負の研究・開発を複数経験させること。同時にその研究プロセスの構造を客観的に分析する。ただし、時間的に限られる大学院時代に、論文研究以外のテーマで真剣勝負を実施するというのは難しい。うまく成果が上がらなかったときの責任の取り方も難しい。